



내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 화재 저항성 평가

원종필^{1)*} · 최석원¹⁾ · 박찬기¹⁾ · 박해균²⁾

¹⁾건국대학교 사회환경시스템공학과 ²⁾삼성물산(주)건설부문 토목사업본부

Evaluation of Wet-Mixed High Strength Sprayed Polymer Mortar for Fire Resistance

Jong-Pil Won^{1)*}, Seok-Won Choi¹⁾, Chan-Gi Park¹⁾, and Hae-Kyun Park²⁾

¹⁾Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

²⁾Samsung Corporation Engineering & Construction Group, Civil Engineering Technology Team, Sungnam 463-721, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to evaluate the mechanical performance and fire resistance of wet-mixed high strength sprayed polymer-modified mortar in order to protect tunnel lining system which are in the event of fire disaster. Since the current commercial fire-resistant materials reproduce the low strength issue of mortar, this study aims to provide an enhanced fire-resistant mortar with a proper strength. Normally, a large temperature gradient phenomenon arise in the vicinity of free surfaces which are fully exposed in the event of persistent flame. Thereby, the determination of optimal cover depth of wet-mixed high strength sprayed polymer- mortar(WHSPM) is important for fire-resistance of tunnel lining system. With comparison of current commercial fire-resistance materials and WHSPM, the experimental result of WHSPM shows the better fire-resistant performance than the others. In addition, the cover limitation should be controlled by minimum 4cm depth in order to avoid fire-induced damage.

Keywords cover thickness, fire resistance of tunnel, high strength, polymer, sprayed mortar

1. 서 론

최근 세계적으로 도로 및 철도터널에 대형화재가 발생하고 있으며 이로 인해 경제적, 사회적으로 심각한 손실이 발생하고 있는 실정이다. 이처럼 폐쇄된 공간인 터널 내 화재 발생 시 구조체의 강도저하로 인한 붕괴 및 인명피해 뿐만 아니라 사회기반시설인 교통망을 장시간 끊어 놓게 되는 등 큰 문제를 발생시킨다¹⁾.

터널이나 지하구조물의 주재료인 콘크리트는 내화성능이 우수한 재료로 널리 사용되어 왔으나 화재시 고열을 받게 되면 폭렬이 발생하고 이로 인해 구조체 내부까지 고온이 전달되고 내하력 저하를 초래하여 경우에 따라서는 구조체의 붕괴를 일으킬 수 있는 원인이 되기도 한다^{2,4)}. 이와 같은 폭렬 현상은 고강도 콘크리트와 같이 낮은 물·시멘트비와 내부 조직이 치밀할수록 폭렬 발생이 용이하며 부재의 구속조건, 콘크리트 내 함수율, 하중의 종류 등 다양한 변수에 의해서도 발생된다. 또한 화재의 원인이 되는 차량이나 열차의 종류에 따라 달라지기도 한다^{5,7)}.

터널구조물의 내화방법으로는 크게 4가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로 구조물 자체의 내화성능을 증가시키는

방법으로 터널의 주 지보재인 슛크리트에 내화성능을 부여하는 것이다. 두 번째로는 구조물의 표면에 열의 전달을 지연할 수 있는 코팅재료를 적용하는 방법이며 세 번째로는 뿔칠용 재료로 2차라이닝을 실시하는 방법으로 현재 터널에서 가장 널리 사용되는 방법이다. 마지막으로 내화용 프리캐스트 판넬/보드를 설치하는 방법으로 최근 들어 유럽의 여러 국가 들을 중심으로 터널 내화방법으로 그 사용량이 점점 증가하고 있다⁸⁾. Table 1은 현재 국내외에서 터널구조물의 내화용 재료로 사용되는 제품의 적용방법을 나타낸 것이다.

상기의 방법 중 국내·외적 가장 널리 사용되는 터널내화방법은 내화용 뿔칠재료로 2차라이닝을 실시하는 방법과 내화용 프리캐스트 판넬/보드를 설치하는 방법이다⁸⁾. 터널 구조물에 내화용 뿔칠재료를 사용하는 경우는 충분한 내화성능을 확보할 수 있지만 터널 구조물에 장기간 부착되어 있지 못하고 박락 및 탈락의 문제점을 노출하고 있으며 특히 진동 및 내부 공기압 등이 존재하는 환경에 노출시 문제는 더욱더 심각하게 나타나고 있다⁹⁾. 일반적으로 도로터널의 경우 약 25 Pa, 철도터널에서는 약 600 Pa 정도의 표면압력을 가지고 있는 것으로 알려져 있다⁸⁾. 특히 이와 같은 표면 압력은 통과하는 자동차 및 기차의 속도, 수량에 따라 변화하며 철도 터널 및 고속도로 터널 등은 진동이 심하게 발생할 경우 표면 압력은 더욱

*Corresponding author E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

Received January 27, 2006, Accepted June 12, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

Table 1 Typical fire protection materials for tunnel

Materials	Type materials	Type construction	Attachment
Calcium silicate board	Panel	Pre-manufactured panel	Anchor bolt
Light weight concrete	Light weight concrete	Attached to surface	Spray
CIP concrete	Cement	Cast-in-place	Integral with structure
CIP concrete/fiber	Cement with pp fibers	Cast-in-place	Integral with structure
Shotcrete	Cement/additives	Spray	Spray
Shtocrete/fiber	Cement/additives/pp fibers	Spray	Spray
Mineral wools	Mineral wool in cement matrix	Spray	Spray
Ceramic refractory	Refractory cement/ceramic mix	Spray	Spray

더 증가할 수 있다. 따라서 최소한 상기의 압력에 견딜 수 있는 부착강도를 내화용 재료는 가지고 있어야 한다. 그러나 일반적인 뿔칠용 재료는 강도가 매우 작아서 탈락 및 박락 현상이 크게 발생할 수 있다. 내화용 precast panel/board의 경우 공장 제작제품으로 품질관리가 용이하고, 앵커 등을 이용하여 부착시키기 때문에 해외에서는 shield 터널을 중심으로 적용이 증가하고 있다⁸⁾.

본 연구는 내화용 뿔칠 재료의 탈락 및 박락의 문제를 해결할 수 있는 고강도의 내화용 습식 폴리머 스프레이 모르타르의 내화성을 평가하고자 하였다. 특히, 기존 뿔칠용 내화 재료가 강도가 약하기 때문에 발생하는 문제점을 해결하기 위하여 강도를 증가시키는 동시에 내화성을 가지게 하는 것을 목표로 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 압축강도, 휨강도 및 화재시험을 실시하였으며 시험결과는 기존 해외에서 사용되고 있는 두가지 종류의 내화용 뿔칠재료와 비교하였다. 또한 개발된 내화용 습식 고강도 폴리머 스프레이 모르타르의 화재로부터 기존 구조체를 보존할 수 있는 두께를 결정하고자 피복 두께에 따른 내부온도의 변화를 평가하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 혼화재

본 연구에서 사용한 시멘트는 H사의 1종 보통 포틀랜드

시멘트를 사용하였으며, 혼화재로는 실리카흄(SF)을 사용하였다. 물리·화학적 성질은 Table 2와 같다.

2.1.2 골재

잔골재는 인조 규사를 사용하였다. 인조 규사는 원석의 순도가 높고 석영질이며 SiO₂의 함량이 98~99% 정도이다. 또한 규암질에 비해 색도가 백색이고, 경질이며, 내화도가 높다. 연구에 쓰인 규사의 최대 치수는 2 mm이다. 또한 내화피복재로 팽창 펄라이트를 사용하였으며 물리적 성질은 Table 3과 같다. 팽창 펄라이트의 단위용적중량은 0.05~0.30 g/cm³로서 경량으로 무수한 기공을 함유함으로써 체적대비 중량이 작으며 초경량으로서 적용제품의 비중을 낮출 수 있다. 또한 열전도율이 0.03~0.05 kcal/mh·°C이며 다공질로서 분체간에 점접촉으로 연결되어 자체의 고체 열전도는 매우 적고 입자간의 공극에 미립자가 충전되어 대류를 방지함은 물론 입자 색상이 백색이기 때문에 복사에 대한 단열성도 뛰어나며 무기물로만 되어 있는 광물질로 불연성 재료이다¹⁰⁾.

2.1.3 폴리머 및 혼화제

폴리머는 재유화형 분말수지중 시멘트 재료에 매우 안정된 특성을 보이며 접착성능이 우수한 에틸렌-비닐아세테이트(EVA)계 폴리머를 사용하였다. 또한 폴리머에 함유된 계면활성제 및 분산제에 의하여 과도한 공기가 연행되기 때문에 폴리머 콘크리트에서 사용되는 일반적인 소포제를 사용하였으며 균열의 감소, 박리 방지, 충전성

Table 2 Physical and chemical properties of silica fume

Specific Gravity	Ig. loss	Fineness (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)
2.2	2.8	180,000~200,000	94.0	0.3	0.8	-	0.3	0.4	0.8	0.2

Table 3 Physical properties of Perlite

Specific gravity	Percentage of void	Thermal conductivity(kW/m ²⁰ C)	Service temperature (°C)	pH	F.M.	Color
0.15	90%	3.49~5.82×10 ⁻⁵	-250~1000	6.5~7.5	2.94	white, light gray

Table 4 Properties of polypropylene fiber

Ingredient	S. G	Length (mm)	Diameter (mm)	Melting point (°C)	Tensile St. (MPa)	Alkali resistance
Homopolymer Polypropylene	0.91	19	0.07	162	600	high

향상의 목적으로 수축저감제를 사용하였다.

2.1.4 폴리프로필렌 섬유(PP섬유)

본 연구에서 사용된 망사형 PP섬유의 일반적인 물성은 Table 4와 같다. PP섬유는 고온에서 열응력 및 공극압에 의한 콘크리트의 내화성능과 특히 고강도콘크리트의 투기성을 향상시킨다. PP섬유는 폭렬이 발생하기 전 약 160°C에서 녹아 수증기, 공기, 가스 등이 빠져나가게 하며 시멘트 매트릭스 전반에 걸쳐 고르게 분포되어 투기성이 좋도록 유기적으로 연결된 네트워크를 형성한다.¹¹⁾

2.2 배합설계

목표 압축강도 40 MPa를 만족하는 배합을 결정하기 위하여 예비시험을 통하여 목표압축강도와 열전도율을 최대한 낮게 유지할 수 있게 시멘트 대비 실리카흙 10%, 펄라이트 30%를 치환한 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 배합비를 도출하였다. 도출된 배합비는 안정적인 강도발현과 열전도율이 낮아 단열성을 향상시킬 수 있다. 또한 폭렬 저감에 효과를 획득하기 위해 용융점이 낮은 19 mm의 망사형 PP섬유를 사용하여 배합설계를 실시하였으며 섬유에 대한 폭렬 저감 효과를 평가하기 위해 PP섬유의 혼입율은 기존 연구결과³⁾를 이용하여 0%(P00), 0.15%(P15)와 0.2%(P20)를 적용하였다(Table 5). 일반적으로 EVA계 폴리머는 5~10%를 사용하는 것이 폴리머 콘크리트에서는 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 폴리머 콘크리트의 특성을 가지게 하는 것이 주요 목적이 아니라 터널의 내화성능을 부여하는 것이 최종목적이기 때문에 폴리머 함유율은 스프레이용으로 적합한 점성을 갖고 리바운드 등 재료의 탈락을 방지하면서 어느정도 강도의 향상 및 수밀성을 가질 수 있는 첨가율인 2%를 사용하였다. 또한 시험결과의 비교를 위하여 일본 및 유럽에서 상용화된 2가지 종류(Type A and B)의 내화용 모르타르를 동시에 시험하였다. A제품의 경우 경량골재와 PP섬유를 혼입한 제품이며 B제품은 PP섬유를 혼입하지 않고 주로 팽창질석 등을 포함한 경량골재를 많이 사용하여 공극률이 상대적으로 많은 재료이다.

2.3 시험방법

2.3.1 압축강도

내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 압축

강도 특성을 알아보기 위하여 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 의하여 모르타르의 압축강도 실험을 실시하였다. 50×50×50 mm의 입방체 물드를 9개씩 제작하여 재령 1일, 7일, 28일에서 재령 당 3개씩의 압축강도를 측정하였으며 실험은 2회 반복 실시하였다. 공시체는 현재 사용되고 있는 내화용 모르타르가 수중양생을 실시하고 있어 동일한 조건을 적용하기 위하여 24시간의 초기양생 후에 23±2°C의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

2.3.2 휨강도

휨강도 시험은 KS F 2476(폴리머 시멘트 모르타르의 시험방법) 및 KS F 4042(콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르)에 준하여 휨강도 시험을 실시하였다. 시편은 40×40×160 mm로 3개씩 제작하여 재령 7일, 28일의 휨강도를 2회 반복하여 측정하였다. 시편은 1일 초기양생 후 탈형하여 23±2°C의 항온조건으로 수중 양생하였다.

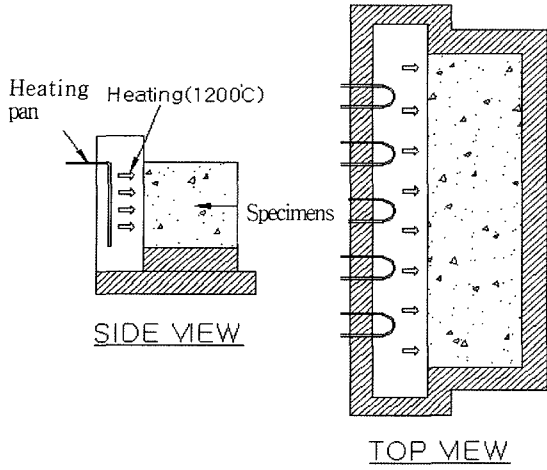
2.3.3 내화실험

내화실험은 100×100×400 mm의 각주형 물드를 제작하여 Fig. 1과 같은 전기로에서 RABT(Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) 시간간열온도곡선에 의해 폭렬 상태 여부를 확인하기 위해서 실시하였다. RABT는 독일 교통성 도로건설부가 규정하는 시간간열온도곡선으로 실제 터널 및 지하구조물에서 차량에 의한 실물실험으로 얻어진 시간간열온도곡선이다¹⁾. RABT곡선은 Eureka 499 프로젝트의 결과물로 터널내에서 화재시 유사한 온도분포를 나타내었으며 독일에서 개발되었다(Haukur 등, 2004). RABT곡선은 5분내 1200°C에 도달하여 30분간 지속된 후 110분 동안 냉각되는 형상을 보이고 있다. 그러나 Eureka 449 프로젝트의 실험대상물의 최고온도는 1000°C 이하이지만 최고온도가 지속된 시간은 대형트레일러인 경우 최소 15분 이상, 기차인 경우 최대 80분까지 지속되며 지하철인 경우 최소 5분 이상 지속된다고 보고하고 있다. 이러한 결과에 따라 RABT곡선에서 30분간 지속되는 최고온도는 특정한 경우에 따라 60분까지 연장될 수 있다. 또한 냉각되는 시간도 상황에 따라 달라지는데 일본에서 냉각되는 시간은 120분으로 정하고 있다¹⁾. 본 연구에서 적용한 RABT곡선은 5분내 1200°C에 도달하여 60분간 지속된 후 120분 동안 냉각시키는 방법을 적용하였다. 또한 실험에 사용된 전기로의 경계조건은 열 재하면, 바닥(단열)을 제외한 모든 면은 공기의 대류가 일어나도록 하였으며, 공시체의 치수는

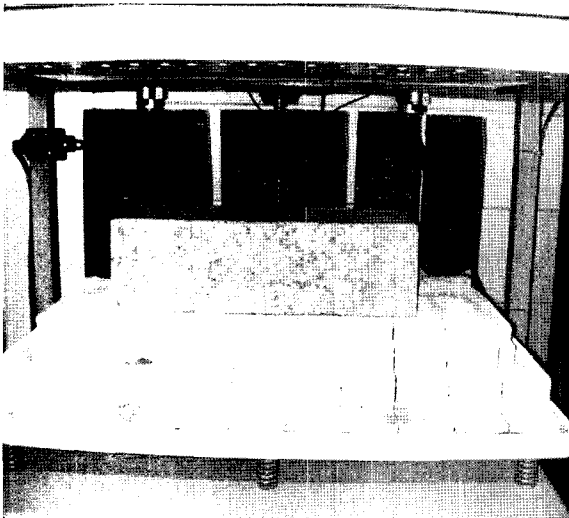
Table 5 Mixture proportions

Type of mortar	W/B	C : S	Perlite (S×Vt%)	SF* (C×%)	PP fiber (Vt%)	Polymer	AA**	SA***	SP**** (C×%)
P00	0.39	1:2	30%	10%	0.00	2%	10%	0.1%	2%
P15	0.39	1:2	30%	10%	0.15	2%	10%	0.1%	2%
P20	0.39	1:2	30%	10%	0.20	2%	10%	0.1%	2%

* Silica fume, ** Antifoaming agent, *** Shrinkage-reducing agent, **** Superplasticizer



(a) Sectional view of fire furnace



(b) Inside view of furnace

Fig. 1 Experimental set up of fire test

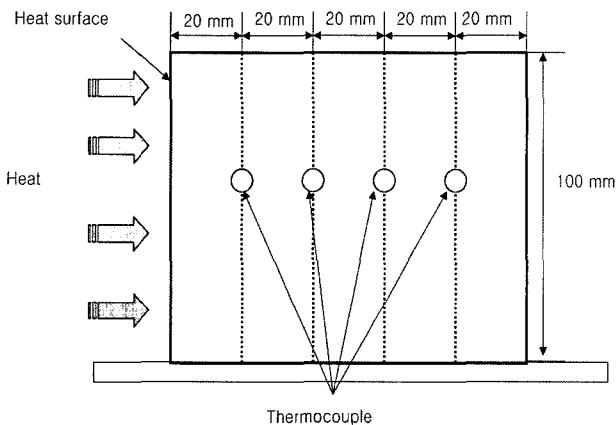


Fig. 2 Distance from specimen surface for internal temperature measure

100×100×400 mm의 각주형 공시체를 이용하였다. 또한 공시체의 내부 온도를 측정하기 위해서 Fig. 2와 같이 K형 열전대를 설치하였다. 또한 내화실험 후 압축 및 휨강도실험을 실시하여 잔류압축강도와 휨강도를 평가하였다.

2.3.4 열전도율

KS L 3306 (열선법에 따른 내화벽돌의 열전도도 측정 방법)에 의하여 공시체(Ø10×6 cm)를 제작하여 Probe를 시편 표면에 놓아두어 열전도율을 식 1에 의하여 산출하였다.

$$\lambda = \frac{q \cdot \ln(t_2 t_1)}{4I(T_2/T_1)} \quad (1)$$

여기서, λ = 열전도율(W/mk) 열선에 흐르는 전류값(A)

q = 단위미터당 전류값(W/m)

t_2, t_1 = 측정 시간(min)

T_2, T_1 = t_2, t_1 에서의 온도(°C)

2.3.5 내화시험 후 공극률 측정

고강도 콘크리트에 PP섬유를 혼입하면 투기성을 증가시켜 화재 발생시 수증기, 공기 및 가스 등이 빠져 나갈 수 있는 경로를 증가시킨다. 즉 PP섬유가 콘크리트 내부에 골고루 분포되어 폭발발생 전 약 160°C에서 용해되어 투기성이 좋도록 유기적으로 연결된 네트워크를 형성한다. 본 연구에서는 내화용 습식 고강도 폴리머 스프레이 모르타르의 화재시험 전후의 투기성을 알아보기 위하여 수은압입법을 이용한 공극률의 변화를 평가하였다.

3. 실험 결과

3.1 압축강도

내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 압축강도 실험 결과는 Fig. 3과 같다. 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 경우 모든 배합에서 목표강도 40 MPa를 근접하는 결과를 보여주었으며 PP섬유 혼입에 따른 영향은 없었다. 그러나 A제품의 경우 28일 압축강도가 17 MPa, B제품은 1일 압축강도 측정시 경화가 이루어지지 않아 측정이 불가능하였고 장기재령으로 가도 강도의 변화가 거의 없었다. A제품은 주 골재가 shell sand로 다공성이며 비중이 낮은 특성을 가지고 있다. B제품은 주 골재가 팽창질석으로 구성되어 있으며 내화용 재료 중 낮은 강도 값을 가지는 특징이 있다.

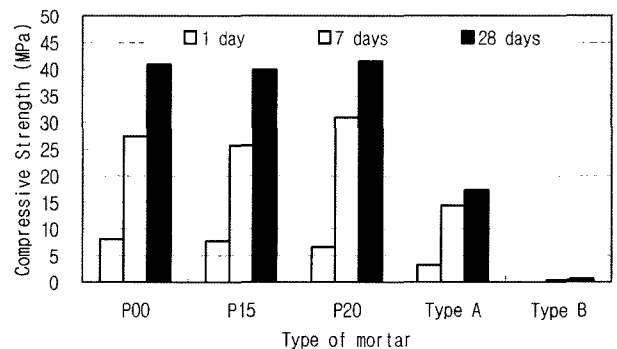


Fig. 3 Compressive strength of wet-mixed sprayed mortar for fire resistance

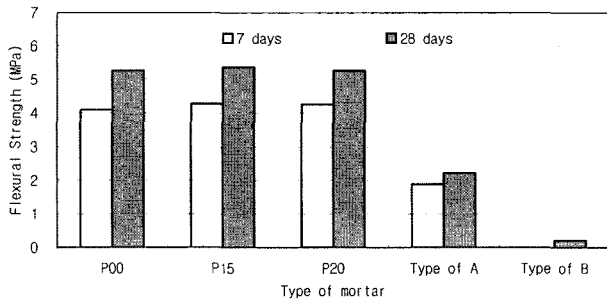


Fig. 4 Flexural strength of wet-mixed sprayed mortar for fire resistance

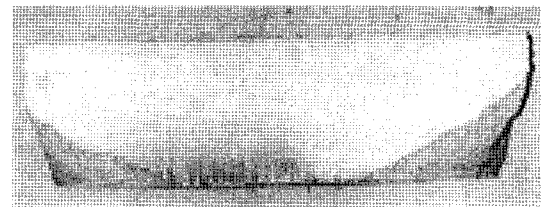
3.2 휨강도

터널의 내화용 재료로 사용되는 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르는 휨하중을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 휨강도를 측정하였으며 휨시험결과 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 휨강도는 재령 28일에 5 MPa를 상회하며 그 결과는 Fig. 4와 같다. 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르는 압축강도 실험 결과와 같이 재령별 강도 발현이 안정되며 충분한 휨강도를 가지고 있다. 이에 반해 A제품의 경우 휨강도가 2 MPa로서 충분한 휨강도를 가지지 못하는 현상을 보이고 있다. 또한 B제품의 경우 재령 7일에 휨강도를 측정하는 것이 불가능하였으며 재령 28일의 휨강도도 사람의 힘으로도 쉽게 파괴될 수 있을 정도로 강도가 발현되지 못하는 현상을 보였다.

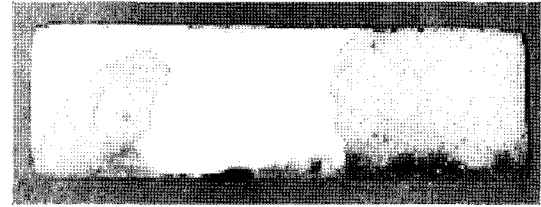
3.3 내화시험

3.3.1 표면관찰

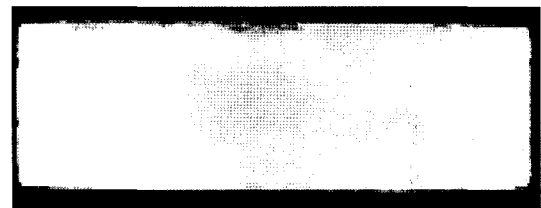
PP섬유의 혼입에 따른 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르와 해외에서 상용되는 A 및 B 두 제품에 대해 내화실험을 실시한 후 표면관찰을 통한 폭발현상을 관찰하였다. PP섬유 혼입별 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르는 내화실험 중 PP섬유가 전 체적에 0.2% 혼입된 배합에서는 폭발이 발생되지 않았지만 PP섬유가 0.2% 이하로 혼입된 배합에서는 폭발이 발생되었다. A 및 B 제품은 내화시험 후 폭발은 발생되지 않았으나 두 제품 모두 표면이 쉽게 부서지는 현상이 발견됐다. A제품의 경우 모서리 부분에 탈락 현상이 발견되었는데 이는 폭발에 의한 탈락이 아닌 내화시험 후 표면이 건조해진 상태에서 탈락이 발생하였다. B제품의 경우 PP 섬유가 없어도 폭발이 발생되지 않았는데 이는 B제품의 강도가 매우 낮아 고온에서 공극압이 발생하더라도 팽창 질석의 변형에 의해 공극압을 외부로 배출하여 폭발은 발생되지 않은 것으로 사료된다. 또한 내화시험 후 표면 색상이 변색되어 황금색을 띄는 현상을 보였다. 이는 표면에 시멘트 페이스트의 수화물이 파괴되고 팽창 질석 및 운모의 골재 색상이 변색된 것으로 사료된다. 내화시험 후 공시체의 표면 모습은 Fig. 5와 같다.



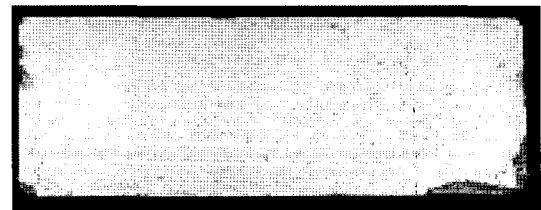
(a) P00 specimen



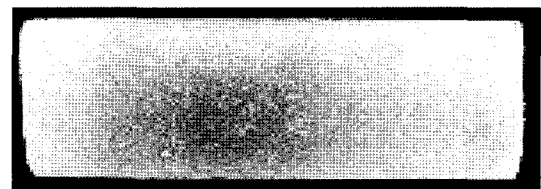
(b) P15 specimen



(c) P20 specimen



(d) Type A



(e) Type B

Fig. 5 Picture of wet-mixed sprayed mortar specimens after fire-resistance test

3.3.2 열전도율

내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 열전도율은 Fig. 6과 같다. 열전도율은 0.0012~0.0014 kW/m²·°C로서 보통콘크리트의 0.0021~0.0029 kW/m²·°C보다 1.5~2배 가량 낮은 열전도율을 나타내고 있다. 이는 열전도율에 가장 큰 영향을 기여하는 골재 중 열전도율이 낮은 팽창 펄라이트로 치환되어 있어서 낮은 결과를 나타냈으며 PP섬유의 혼입량이 많아질수록 열전도율이 감소하는 경향을 보였다. A제품은 0.509 kcal/mh·°C의 열전도율을 보이며 B제품의 경우 0.206 kcal/mh·°C를 보이고 있다. 두 제품 모두 골재가 경량골재로 구성되어 있으며 특히 매우 낮은 열전도율을 가지고 있는 팽창질석을 주 골재로 한 B제품은 제일 낮은 열전도율을 보이고 있다. 열전도율은

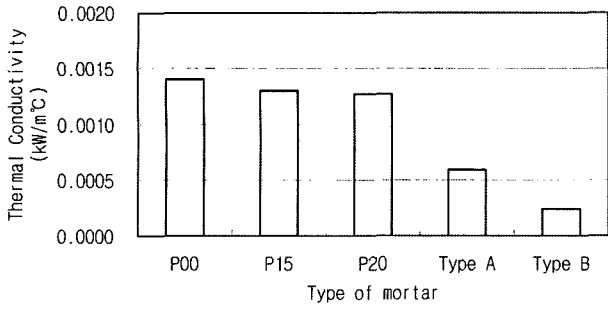


Fig. 6 Thermal conductivity wet-mixed sprayed mortar for fire resistance

단위중량 및 공극률에 따라 연관이 깊은데 단위중량이 적을수록 공극을 많이 함유한 재료일수록 열전도율이 낮다. B제품은 팽창질석의 비중이 평균 0.2이하이며 공극의 함유량이 많아 열전도율이 제일 낮게 나타난 것으로 사료된다.

3.3.3 잔류압축강도 및 휨강도

고강도 내화 모르타르의 내화실험 후 잔류압축강도 및 휨강도는 PP섬유를 0.2% 혼입한 공시체에서 잔류율이 각각 약 32% 및 31%로 나타났으며 그 결과는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. 잔류압축강도 및 휨강도는 폭렬이 일어나지 않은 PP섬유를 0.2% 혼입한 공시체에서만 측정이 가능하였으며 P00 및 P15배합에서는 측정이 불가능 하였다. 실험결과를 보면 PP섬유의 혼입은 콘크리트 폭렬 방지에 효과적인 작용을 할뿐 강도저하를 방지하는데 영향이 없는 것으로 판단된다. 이처럼 강도가 감소하는 것은 1200°C에 노출시 골재의 변형과 시멘트 페이스트의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의

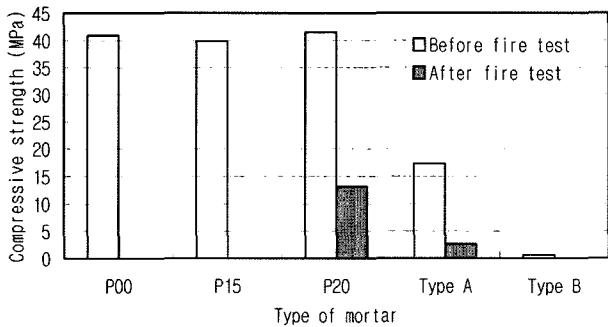


Fig. 7 Residual compressive strength of mortar after fire test

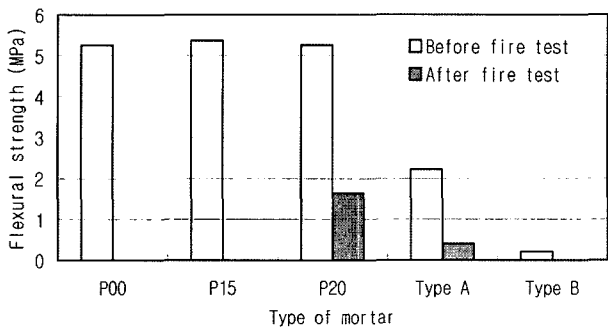
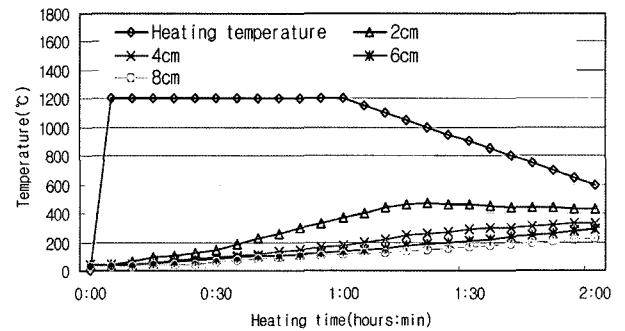


Fig. 8 Residual flexural strength of mortar after fire test

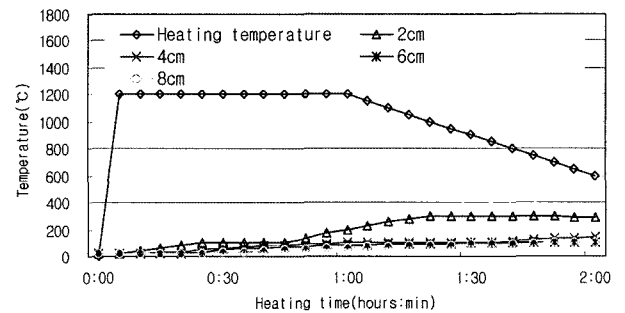
분해로 인한 시멘트 페이스트와 골재 사이의 결합력 저하로 인한 열에 의한 미세균열 발생 및 PP섬유가 용해된 공간 때문에 강도가 저하된 것으로 판단된다. A사 제품의 경우 잔류압축강도 및 휨강도의 잔류율이 각각 15%와 18%를 나타냈다. 이 제품 역시 PP섬유가 강도 감소에 효과적이지 못한 것을 보여주고 있으며 고온에서의 시멘트 페이스트와 골재사이의 결합력 저하와 다량의 미세균열 및 PP섬유가 용해된 공간에 의한 것으로 사료된다. B사 제품의 경우 내화실험 후 잔류압축강도 및 휨강도의 측정이 불가능하였다. 내화실험 전 강도 또한 매우 작기 때문에 내화실험 후 강도는 손에 의해 부스러질 정도로 약해져 있었다.

3.3.4 내부 온도

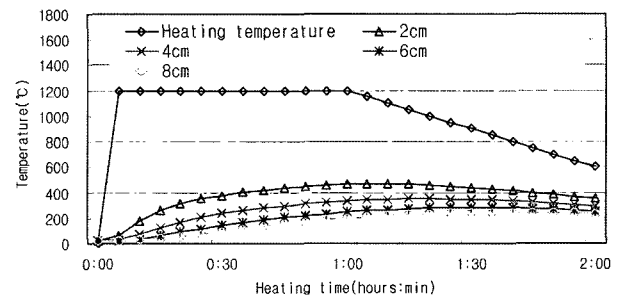
폭렬을 발생시킨 P00과 P15 배합을 제외하고, P20의 고강도 내화 시멘트 모르타르 배합과 A 및 B제품의 내부 온도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 고



(a) Wet-mixed high strength sprayed polymer mortar



(b) Type A



(c) Type B

Fig. 9 Internal temperature distribution of sprayed mortar for fire resistance

강도 내화시멘트 모르타르의 경우 RABT 시간가열온도곡선에 의하여 실행된 온도측정은 표면으로부터 내부 2cm 부근의 최고온도는 469.6°C를 나타냈으며 가열된 지 80분 이후부터 미약하게 감소하는 경향을 보였다. 4, 6, 8cm의 내부온도는 RABT곡선의 열이 감소되는 이후에도 계속적으로 온도가 상승하는 결과를 보였다. Kodur의 연구에 의하면 가열되는 온도가 감소되기 시작하여도 콘크리트 내부 50, 100 mm에서의 온도는 지속적으로 상승하거나 상승하다가 일정한 온도를 유지하는 경향을 보인다고 하였다¹¹⁾. 이처럼 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 표면에 계속적으로 가해지는 열이 내부로 전달되는 현상은 팽창 펄라이트의 비열이 높고 모르타르의 열전도율이 낮아 열이 전이되는 시간이 길어지는 원인과 모르타르의 축열 현상에 의한 것으로 사료된다. 또한, A제품 내부 2cm에서의 온도는 가열 후 85분 뒤 299.5°C의 최고온도를 보인 후 점차 감소하는 특징을 보였으며 내부 4, 6, 8cm의 온도는 RABT 곡선의 열이 감소하는 이후에도 계속적으로 온도가 증가되는 현상을 보였다. 이는 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르와 유사한 결과로 비열이 높고 열전도율이 낮아 열이 전이되는 시간이 길어지는 원인과 축열 현상에 의한 것이다. 그러나 전반적으로 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르보다 낮은 내부온도 결과를 보였는데, 이는 A제품이 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르보다 낮은 열전도율을 가지고 있으며 주 골재가 경량골재인 shell sand로 구성되어 있기 때문에 팽창 펄라이트가 일부 치환된 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르보다 낮은 내부 온도가 측정된 것으로 사료된다. B제품의 경우 2cm의 내부온도가 고강도 내화 모르타르보다 더 높은 값을 보였다. 열이 가해지는 표면으로부터 내부 2cm의 온도는 급속도로 증가하는 결과를 보였지만 내부 4cm이후부터는 낮은 온도를 보였다. 이는 B제품이 강도가 매우 낮고 조적이 밀실하지 못해 열이 내부로 전이되는 속도가 높아 표면 및 내부 2cm까지는 온도가 높아지는 결과를 보였지만 B제품의 열전도율이 매우 낮고 밀도가 0.8 kg/cm³ 이하로 시편의 안쪽으로 갈수록 온도는 낮아지는 현상을 보였다. 내화용 고강도 습식 스프레이 모르타르의 RABT 곡선에서 설정한 1200°C의 온도와 내부온도와의 차이를 A 및 B제품과 비교하였으며 결과를 Fig. 10에 나타내었

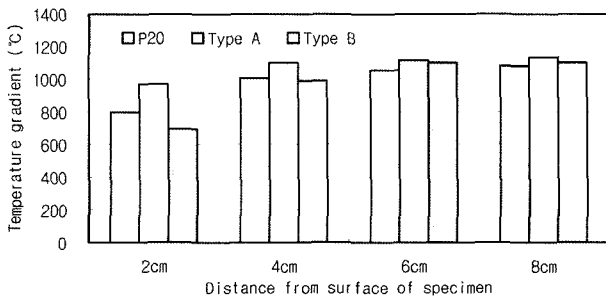
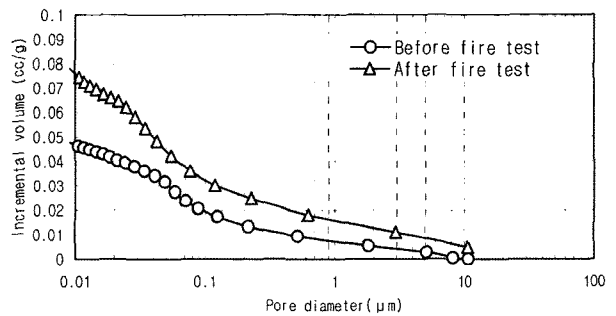


Fig. 10 Internal temperature gradient with distance from surface of specimen

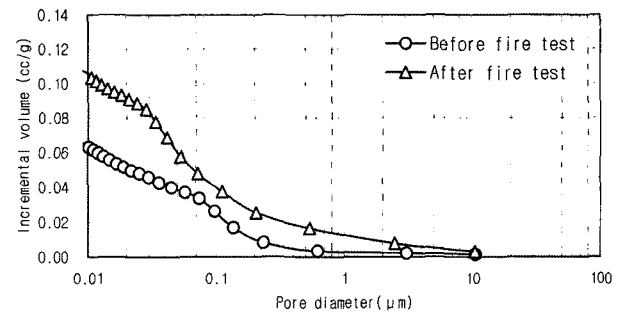
다. 시험결과 내화용 고강도 습식 스프레이 모르타르와 A 및 B제품의 내화로 온도와 내부 온도를 측정할 지점에서 온도차는 2cm에서 약간의 차이를 발생한 것을 제외하고는 거의 동일한 결과를 보여주었다. 또한 온도차이의 정도는 내부로 들어갈수록 줄어드는 경향을 보여주었다.

3.3.5 내화시험 전후의 공극량 분포

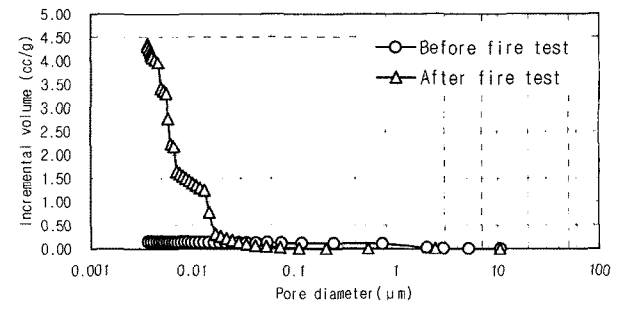
내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르 및 상용제품의 내화실험 전·후의 공극량을 평가하기 위한 수은압입법에 의한 공극량 측정결과는 Fig. 11과 같다. 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 공극지름 크기는 내화실험 전 총 0.0541 cc로 A 및 B제품과 비교하였을 때 작은 값을 보이고 있다. 이는 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르가 고강도를 가지고 있기 때문에 공극의 지름이 상대적으로 작게 나타난 것이다. 내화실험 후 시료의 1g 당 수은압입량은 총 0.0869 cc로 내화실험 전보다 전체 수은압입량이 증가하였는데 이는 혼입된 PP섬유의 용해와 시멘트 페이스트내의 Ca(OH)₂의



(a) Wet-mixed high strength sprayed polymer mortar



(b) Type A



(c) Type B

Fig. 11 Pore size distribution of wet-mixed sprayed mortar and commercial products for fire resistance

분해로 인하여 공극량이 증가하였기 때문이다. 또한, A제품의 경우 내화실험 전·후 수은압입량은 각각 0.0804 cc와 0.124 cc를 보이고 있다. 내화실험 전 0.0804 cc의 수은압입량은 고강도 내화 시멘트 모르타르보다 높은 압입량을 보이고 있으며 이러한 결과는 상대적으로 강도가 작고 공극량이 많기 때문이다. 내화실험 후 수은압입량이 증가한 이유 역시 PP섬유의 용해와 시멘트 페이스트 내에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 분해로 인한 것으로 사료된다. B제품의 경우 내화실험 전 수은압입량은 1 g당 0.1154 cc의 압입량으로 고강도 내화 시멘트 모르타르와 A제품과 비교하여 보면 높은 압입량을 보이고 있다. 이러한 결과 역시 저장도에서 볼 수 있듯이 공극량이 상당히 많기 때문이다. 내화실험 후 수은압입량은 4.3567 cc로 매우 높은 압입량을 보이고 있는데 B제품의 경우 PP섬유를 함유하지 않은 제품으로 공극량의 증가는 모두 내화실험 후 시멘트 페이스트 내에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 분해에 의한 것으로 내화시험시 상당히 큰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 분해가 발생하였다고 할 수 있다.

3.3.6 피복 두께별 내화시험

PP섬유 2%를 혼입한 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르(P20)의 적정 피복 두께를 알아보기 위해 Fig. 12와 같이 150×150×550 mm의 각주형 공시체에 2, 4, 6 cm로 피복두께를 선정하여 공시체를 제작하였다. 기존 구조콘크리트는 설계강도 30 MPa으로 하였으며 배합은 Table 6과 같다. 피복두께별 내부온도측정 결과는

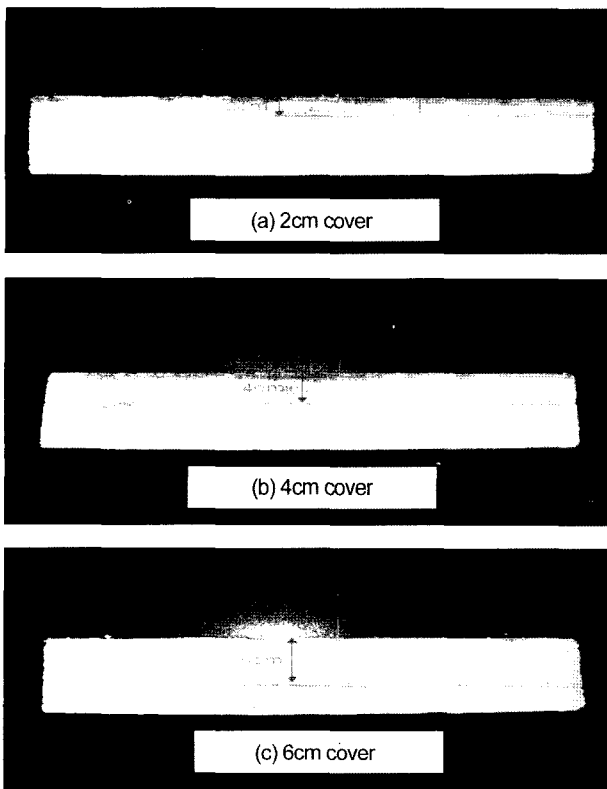


Fig. 12 Fire test specimens with wet-mixed high strength sprayed polymer mortar cover thickness

Table 6 Mix proportion of based concrete

Slump (cm)	Air content (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				W	C	S	G	SP	AE
21±3	5±1.5	39.2	46.7	156.0	398.0	792.1	897.1	5.17	0.099

Table 7 Temperature variation of wet-mixed high strength sprayed polymer mortar with cover thickness

Cover thickness	Time	2 cm(°C)	4 cm(°C)	6 cm(°C)	8 cm(°C)
2 cm	0:00	22.8	29.5	41.6	42.4
	0:30	121.1	100.4	87.3	84.6
	1:00	301.6	189.5	145.6	142.2
	1:30	410.8	301.0	223.0	211.0
	2:00	404.7	353.5	316.4	303.9
	2:30	409.8	391.7	384.3	370.2
4 cm	0:00	36.8	39.5	32.8	33.1
	0:30	144.9	100.0	88.9	92.6
	1:00	360.3	188.8	145.0	145.5
	1:30	452.4	299.9	219.4	209.8
	2:00	426.0	352.2	309.1	289.5
	2:30	419.8	390.3	374.4	350.8
6 cm	0:00	36.7	28.8	33.2	33.3
	0:30	144.7	95.7	82.1	75.8
	1:00	359.8	180.7	144.4	133.6
	1:30	451.8	287.0	221.3	202.8
	2:00	425.4	337.1	310.8	296.1
	2:30	419.2	373.5	377.4	362.8

Table 7과 같다. 피복두께가 커질수록 내부온도는 감소하는 경향을 보였다.

또한, 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 피복두께별 내부온도의 차이가 크게 나타나지 않은 현상은 건축물 내화시험에 기준이 되는 ISO 834 시간가열온도곡선보다 더 가혹한 RABT 시간가열온도곡선을 채택하여 실험을 하였고 RABT곡선에 따라 온도가 줄어도 한번 가열된 공기가 빠르게 냉각되지 않고 어느 정도의 온도를 유지한 채로 내화로에 머물고 있어서 이러한 현상이 나타난 것으로 사료된다. 기존 연구결과를 보면 콘크리트의 온도가 400°C이상으로 가열될시 시멘트 페이스트에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 분해로 강도 손실이 급격히 일어난다고 하고 있다^{10,11)}. 따라서 피복두께 이상 깊이의 온도 측정에서 400°C이하로 내부온도가 유지되는 결과를 보인 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르 피복두께 4 cm 이상을 적용하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널 및 지하공간 구조물의 화재에 대

한 안전성을 확보를 위하여 적용되는 내화용 습식 스프레이 모르타르의 저장도로 발생하는 장기적인 박락 및 탈락의 문제를 해결할 수 있는 압축강도 40 MPa 이상의 내화용 습식 고강도 폴리머 스프레이 모르타르의 역학적 및 화재시험 후 성능을 평가하기 위한 것으로 시험결과는 해외에서 시판중인 2개 제품에 대해 비교·분석하였다. 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 모든 배합에서 압축강도 및 휨강도는 재령 28일에서 각각 40 MPa 및 5 MPa 이상을 강도를 보였다.
- 2) 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 내화시험 결과, 0.2% PP섬유를 혼입한 경우에만 폭렬이 발생하지 않았고, 그 보다 작은 0.15% 혼입 및 섬유를 혼입하지 않은 경우 폭렬이 발생하였다.
- 3) 열전도율은 B제품이 제일 낮은 0.00024 kW/m²·°C을 보였으며 A제품은 0.00059 kW/m²·°C, 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르는 이보다 높은 0.0012~ 0.0014 kW/m²·°C의 열전도율을 보였다. B제품의 경우 열전도율이 낮은 팽창질석이 주골재로 인하여 열전도율이 낮았으며 A제품 또한, shell sand로 인하여 열전도율이 낮았다. 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르는 두 제품보다 높게 측정됐지만 보통콘크리트보다 1.5~2배 이상 낮은 열전도율을 보였다.
- 4) 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 표면으로부터 2, 4, 6, 8 cm의 내부온도를 측정된 결과, 최고온도는 2 cm에서 469.6°C가 측정되었다. 또한 4, 6, 8 cm에서는 RABT 시간간열온도곡선에서 열이 감소하더라도 지속적으로 온도가 상승하였는데, 이는 팽창 펄라이트의 비열이 높고 모르타르의 열전도율이 낮아 열이 전이되는 시간이 길어지는 원인과 모르타르의 축열 현상에 의한 것이다.
- 5) 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 내화시험 전·후의 수분흡입 공극측정결과 내화시험 전에는 기존 제품에 비하여 공극량이 작게 나타났는데 이는 기존 제품보다 강도가 크기 때문이다. 내화시험 후 공극량은 증가하는 결과를 얻을 수 있었으며 이는 PP섬유의 용해와 시멘트 페이스트에 Ca(OH)₂의 분해로 인한 것이다.
- 6) 내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르 각 2, 4, 6 cm의 피복두께를 선정하여 내부온도를 측정된 결과, 피복두께가 클수록 내부온도는 감소하는 경향을 보였다. 콘크리트는 400°C이상 가열시 급격한 강도손실이 일어나기 때문에 적정 피복두께 이상에서 내부온도가 400°C이하가되는 피복두께를 선정된 결과 4 cm이상으로 하면 기존 구조체의 온도는 400°C 이하가 되어 보호가 가능할 것으로 본다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Haukur, I., and Anders, L., Recent Achievements Regarding Measuring of Time-Heat and Time-Temperature Development in Tunnel, *Safe & Tunnels, First International Symposium*, Prague, 2004, pp.87~96.
2. Kalifa, P., Menneteau, F. D., and Quenard, D., "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures", *Cement & Concrete Research*, Vol.30, 2000, pp.1~13.
3. Pierre, K., Grégoire, C., and Christophe, G., "Hightemperature behaviour of HPC with polypropylene fiber from spalling to microstructure", *Cement & Concrete Research*, Vol.31, 2001, pp.1487~1499.
4. Xin, L., Wei, S., and Sammy, Y. N. C., "Effect of High Temperature and Cooling regimes on the Compressive Strength and Pore Properties of High Performance Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.14, 2000, pp.261~266.
5. Ahmed, G. N. and Hurst, J. P., "An analytical approach for investigating the causes of spalling of high-strength concrete at elevated temperatures", *Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete*, NIST Special Publication 919, 1997, pp.95~108.
6. Felicetti, R., Gambarova, P. G., Corsi, F., and Giannuzzi, G., "Residual Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High-Temperature Cycles", *Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*, France, 1996, pp.579~588.
7. Gabriel, A. K., "Passive fire protection in tunnel," *Concrete for the Construction Industry*, Vol.37, No.2., 2003, pp. 31~36.
8. ITA Working group No. 6 Maintenance and repair, *Guidelines for structural fire resistance for road tunnels*, ITA, 2004, pp.1-1~9-1.
9. Uomoto, T., 신간선 콘크리트터널의 박락과 콘크리트 구조물의 열화 보고서, 2002, pp.12~32.
10. Zongjin L., Xiangming, Z., and Bin, S., "Fiber-Cement Extrudates with Perlite Subject to High Temperatures", *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, Vol.16, No.3, 2004, pp.221~229.
11. Kodur, V. K. R., Bilodeau, A., and Hoff, G. C., Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire, *Cement & Concrete Composites*, Vol.26, Issue2, 2004, pp.163~174.

요약 본 연구의 목적은 화재에 의하여 붕괴 위험성이 있는 터널콘크리트 구조물을 보호하기 위해서 사용하는 습식 고강도 폴리머 스프레이 모르타르의 역학적 특성과 화재저항성을 평가하는 것이다. 본 연구의 주요 목적은 낮은 강도를 가지고 있어 내화재료로서 충분하지 않은 현재 사용되고 있는 재료의 단점을 극복하기 위하여 강도와 화재저항성을 동시에 증가시키는 것이다. 또한 습식 고강도 폴리머 스프레이 모르타르의 피복두께에 따른 내부온도분포를 평가하였으며 화재가 발생하였을 경우 터널콘크리트 구조물을 보호할 수 있는 습식 고강도 폴리머 스프레이 모르타르의 최적 두께를 결정하였다. 본 연구의 결과 습식 고강도 폴리머 스프레이 모르타르는 현재 상용화되어 있는 내화용 재료와 비교하여 강도가 높았으며, 우수한 내화성능을 확보하였다. 무엇보다도 화재로부터 기존 구조물을 보호하기 위한 고강도 폴리머 모르타르의 최적 피복두께는 4 cm 이상 이었다.

핵심용어 피복두께, 터널내화, 고강도, 폴리머, 범질재료